УДК 535.36, 535.361, 543.436

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ОБЛАСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

В.Ф. Мышкин

Томский политехнический университет
E-mail: gos100@list.ru

Излагаются разработанные автором интерференционные методы выделения потока малоуглового рассеяния и формирования меток для счета дисперсных частиц. Приводятся результаты экспериментальных исследований взаимодействия светлых полос интерференционного поля с потоком дифрагированного на непрозрачных объектах излучения.

Введение

Гетерогенные системы имеет широкое распространение в технике и технологии. Для определения содержания компонентов и пространственной структуры гетерогенных плазменных потоков перспективны оптические методы диагностики. Эффективно использование лазерных методов при изучении процессов горения, газодинамики, аналитической химии [1]. Интерференцию лазерных пучков широко используют при диагностике скорости и различных параметров гетерогенных и плазменных систем. Разработаны и используются: лазерная доплеровская анемометрия для определения скоростей потоков и размеров дисперсных частиц [2], интерферометрия и голографическая интерферометрия. Интерференционные полосы могут быть использованы в качестве меток в счетном объеме [3].

Доплеровские методы позволяют одновременно измерять скорость, размер и концентрацию частиц [4]. Размеры частиц определяют по зависимости амплитуды доплеровского сигнала от их диаметра, а концентрацию – по числу импульсов фототока. Путем измерения глубины модуляции фототока в методе ЛДА можно определять размеры частиц [2]. Контраст интерференционных полос в рассеянном излучении определяется формой, размерами и концентрацией дисперсных частиц. Размеры частиц можно оценивать, когда их диаметр сравним с периодом интерференционной картины.

Нами разработаны и апробированы интерференционные методы диагностики конденсированной фазы плазменных систем [5–7].

Малоугловая индикатриса. Для выделения потока излучения, рассеянного в направлении угла в 0°, разработан способ регистрации малоугловой индикатрисы рассеяния, в котором используется явление интерференции [7]. Зондирующий пучок оптического излучения, прошедшего через рассеивающую среду, а также поток оптического излучения, рассеянного на рассеивающей среде на малые углы, и пучок опорного оптического излучения совмещают и фокусируют в плоскости, в которой регистрируют распределение по углам интенсивности излучения. При этом угол пересечения оптических осей опорного и зондирующего пучков оптического излучений выбирается так, чтобы период интерференционной картины указанных пучков превышал диаметры фокальных пятен опорного и зондирующего пучков. Фокальные пятна зондирующего и опорного оптического пучков совмещаются в одном из минимумов интерференции. Если в плоскости регистрации интенсивность прошедшего рассеивающую среду зондирующего оптического излучения не превышает порога чувствительности используемого фотоприемника, то регистрируется только рассеянное излучение.

Счет частиц. Способ формирования счетного объема рассчитан для измерения при концентрации дисперсных частиц более 10^4 см$^{-3}$ [5]. При этом измерения возможны в гетерогенной среде с высокой концентрацией частиц, но имеющей размеры, обеспечивающие преобладание однократного рассеяния зондирующего излучения. Для этого формируются два пучка коллимированных и поляризированных в одной плоскости оптических излучений. Пучки направляются навстречу друг к другу вдоль одной прямой, в результате чего формируется стоячая интерференционная картина. Пучки дополнительно фокусируются в общую точку, которую совмещают с одним из узлов стоячей волны. При этом ось газодисперсного потока совмещают с областью перетяжки пучков зондирующих излучений. Собирают поток рассеянного оптического из-

лучения на фотоприемник с диафрагмой, который преобразовывают в электрический сигнал. Скорость дисперсной частицы определяют по времени между двумя соседними пиками высокочастотной составляющей электрического сигнала. Размеры дисперсных частиц могут быть определены по амплитуде переменной составляющей рассеянного излучения, например из градуировочной кривой. На рис. 1 приведены графики распределения в области каустики составляющих поля излучения и распределения сечения потоков зондирующего излучения.

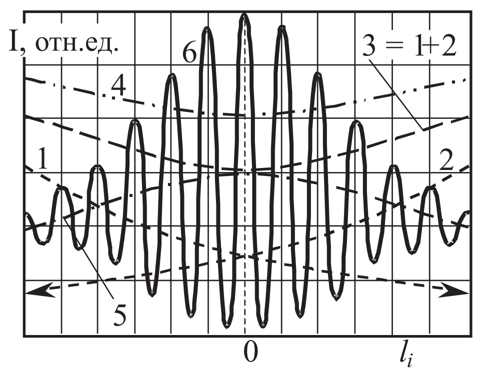


Рис. 1. *Распределение составляющих поля излучения в области каустики: 1), 2) мощность исходных потоков, 3) сечение пучка при отклонении от области каустики; суммарные: 4) мощность некогерентных потоков, 5) интенсивности некогерентных потоков, 6) интенсивность когерентных пучков*

Распределение мощности распространяющегося в ослабляющей среде излучения описывается экспоненциальным законом (закон Бугера) (рис. 1, кривые 1, 2). Результирующее поле оптического излучения в ослабляющей среде при зондировании двумя встречными не когерентными потоками равно их арифметической сумме (см. рис. 1, кривая 3). Распределение сечения фокусируемого пучка при отклонении от фокальной плоскости объектива описывается параболой $S=\pi(dl_i/2F)^2$ (рис. 1, кривая 4), где l_i – величина отклонения от фокальной плоскости объективов, F – фокусное расстояние объективов, d – диаметр пучка коллимированного оптического излучения. Распределение результирующей интенсивности излучения при взаимодействии двух встречных когерентных пучков вдоль направления их распространения модулировано по гармоническому закону (рис. 1, кривая 6) относительно уровня распределения суммарной интенсивности не когерентных потоков (рис. 1, кривая 5). При этом формируется стоячая световая волна. Из рис. 1 видно, что в счетном объеме, при условии выравнивания интенсивностей встречных потоков, наблюдаются максимальные значения интенсивности и контраста интерференционных полос.

Из закона сохранения энергии следует, что в стоячей световой волне, амплитуда которой имеет пространственную модуляцию интенсивности, абсолютное значение потерь энергии излучения в области максимума интерференционной картины имеет наибольшее значение. Абсолютная величина коэффициента потерь излучения в разных точках поперек направления интерференционного максимума изменяется в диапазоне от нуля до максимального значения. Наибольшая интенсивность излучения в области интерференционного максимума равна удвоенной сумме взаимодействующих потоков.

Для смещения пространственного положения счетного объема внутри гетерогенной среды (сканирования внутри объема гетерогенной среды), кроме перемещения фокусирующих объективов вдоль оптической оси потоков излучения, необходимо синхронно изменять соотношение интенсивностей взаимодействующих пучков. При этом в счетный объем может быть доставлено максимальное количество энергии.

Размер фокального пятна лазерного пучка ограничивается дифракционной расходимостью. Величина счетного объема определяется произведением площади фокального пятна используемого объектива на длину области перетяжки встречных пучков, так как при отклонении от области перетяжки интенсивности в пучностях стоячей световой волны уменьшаются обратно пропорционально квадрату расстояния отклонения от области каустики

$$I_i = I_o \frac{F^2}{l_i^2},$$

где I_i, I_o – интенсивности излучений в интерференционных максимумах в гетерогенной среде и в коллимированном пучке.

Приведенное выше условие позволяет сформировать счетный объем предельно возможной малой величины для используемой длины волны оптического излучения.

Максимальная концентрация дисперсных частиц (численно равная обратной величине счетного объема), при которой в счетном объеме одновременно может находиться лишь одна из них, определяется соотношением:

$$N = \frac{2}{\pi} \frac{d^4}{F^4 \lambda^3},$$

где λ – длина волны используемого оптического излучения. Для использованной геометрии пучков оптических излучений максимальная концентрация дисперсных частиц в счетном объеме, при которой возможны измерения скорости отдельной микронной дисперсной частицы превышает 10^4 см$^{-3}$ (теоретически рассчитанное значение составляет $4\cdot10^9$ см$^{-3}$).

При реализации способа использован гелий-неоновый лазер ЛГН-118 на длине волны λ=0,6328 мкм, из выходного излучения которого формировали коллимированный пучок диаметром d=20 мм. Для фокусирования потоков излучений, сбора рассеянного (под углом 45° к направлениям пучков оптического излучений) из счетного объема излучения на частицах латекса диаметром 1 мкм использовался объектив "Гелиос-44М". Собирающий объектив строил увеличенное в 5 раз изображение счетного объема на диафрагме диаметром 0,3 мм, за которой располагали

ФЭУ-114, имеющий высокую чувствительность к излучению видимого диапазона. Электрические сигналы ФЭУ регистрировали с помощью запоминающего осциллографа С8-12. При взаимном ориентировании под углом 45° осей пучков оптического излучений и вектора скорости частицы латекса электрический импульс был модулирован высокочастотной составляющей с периодом 0,3 мкс. Скорость дисперсной частицы может быть определена из выражения:

$$\upsilon = \frac{\lambda}{2t\cos\alpha},$$

где α – угол между вектором скорости дисперсной частицы и направлением распространения оптического излучения, t – время пролета частиц между экстремумами интерференции (максимумами электрического сигнала ФЭУ).

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования по изучению рассеяния из области интерференции двух лазерных пучков, результаты которых приведены ниже, проводились с целью получения данных для более точной оценки предельной концентрации дисперсных частиц, при которой электрические импульсы при счете дисперсных частиц по разработанному нами методу [5] могут быть интерпретированы однозначно. Для этого исследовали взаимодействие дифрагированного на различных объектах оптического излучения с интерференционными полосами.

Классическая идеальная интерференционная картина состоит из светлых полос на темном фоне. В таком поле при размещении в области интерференционного минимума ослабляющего свет объекта исходные пучки не должны терять энергии. Известно, что распределение интенсивности при интерференции двух когерентных волн определяется соотношением $I=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\beta$, где β – угол схождения интерферирующих пучков. Из этого соотношения видно, что теоретически интенсивность излучения может быть равной нулю лишь в одной точке при взаимодействии потоков равной интенсивности. Наблюдение темных полос с нулевой интенсивностью как визуально, так и при фотографировании, связано с нечувствительностью этих регистраторов к потоку излучения малой интенсивности на фоне более ярких областей.

В интерференционное поле, полученное при взаимодействии пучков диаметром 16 мм, сходящихся под углом $6\cdot10^{-4}$ рад (в начале области схождения), в одну из светлых интерференционных полос вносили проволоку диаметром 80 мкм. Для экспериментальных исследований при формировании интерференционной картины использовали установленные через слой глицерина поверхности гипотенузных граней двух прямоугольных призм из оптического стекла, интерферометр Майкельсона. Слой глицерина позволяет изменять и фиксировать угол между направлениями распространения интерферирующих пучков. Расстояние между максимумами интерференционной картины изменяли в диапазоне 1...3 мм. В качестве поглощающих экранов, кроме проволока диаметром 80 мкм, апробированы листы бумаги. При внесении в один из минимумов интерференционной картины поглощающего экрана длиной 210 мм наблюдается увеличение ширины темной полосы (уменьшение ширины смежных светлых полос), что обусловлено законом распределения интенсивности в интерференционной картине. Даже при расположении ослабляющего объекта в пределах "темной" полосы происходит потеря энергии обоих пучков.

Принципиальная схема установки для регистрации интерферограмм приведена на рис. 2. Часть луча гелий-неонового лазера ЛГН-118 на длине волны 0,6328 мкм после коллимирования отводилась вбок, с помощью делительного куба, в виде двух когерентных интерферирующих между собой пучков. Интерференционную картину разворачивали по диафрагме размерами 0,02×3,0 мм, за которой располагали ФЭУ-83. Частота вращения поворотного зеркала составляла 8,76 мин$^{-1}$.

Для ввода в ПЭВМ экспериментальных данных была использована звуковая плата. Выходное напряжение ФЭУ через экранированный радиочастотный кабель подавали на микрофонный вход звуковой платы ПЭВМ. Эти данные регистрировали в виде звукового (или текстового) файла и просматривали на мониторе компьютера с помощью программы CoolEdit обработки звука. Частота дискретизации звуковой карты составляла 44,1 кГц.

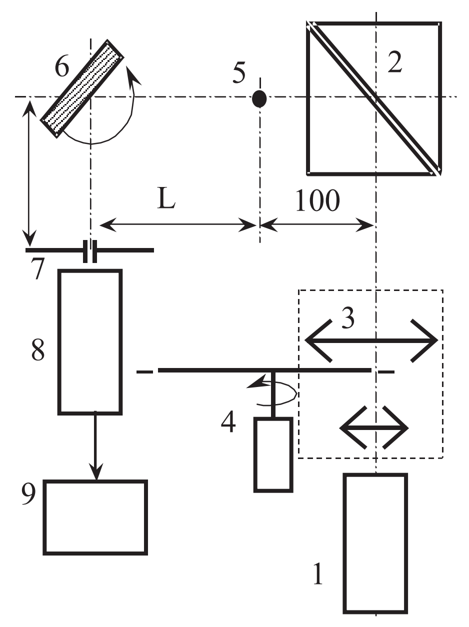


Рис. 2. *Принципиальная схема регистрации распределения интенсивности в интерференционной картине: 1) лазер, 2) куб делительный, 3) коллиматор, 4) модулятор, 5) проволока, 6) поворотное зеркало, 7) диафрагма, 8) ФЭУ, 9) компьютер*

На рис. 3–5 приведены графики распределения интенсивности в области интерференции пучков гелий-неонового лазера при размещении в ней светорассеивающих объектов. На одном из графиков

распределения интенсивности по сечению коллимированного пучка, зарегистрированной нами при внесении в максимум интерференции проволоки диаметром 80 мкм, шестой слева максимум интерференции промодулирован с частотой, в 6 раз превышающей частоту основных пиков (рис. 3). Приведенную на рис. 3 интерферограмму регистрировали на расстоянии 0,135 м от проволоки. Смежные с модифицированной светлой полосой минимумы также содержат дополнительные пички (форма области минимума имеют особенности). Высокочастотная модуляция сигнала, соответствующая областям максимумов интерференционных полос, обусловлена дробовыми шумами ФЭУ, пропорциональными величине входного светового потока. Из анализа формы 5–7 максимумов в распределении интенсивности следует, что проволока внесена в область середины светлой полосы. На рис. 3 также приведена часть невозмущенной интерферограммы в виде пунктирной кривой.

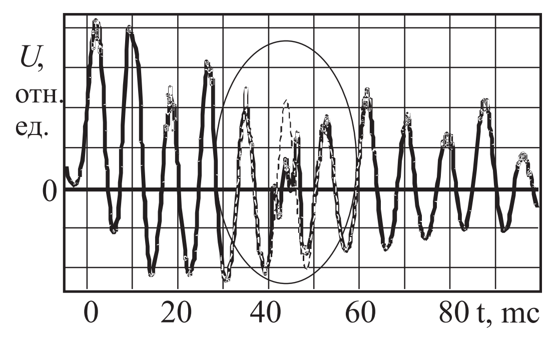


Рис. 3. *Интерферограмма на расстоянии 135 мм от проволоки 80 мкм*

Очевидно, что амплитудная модуляция максимума одной или нескольких из интерференционных полос связана со взаимодействием исходных потоков с дифрагированной волной. При внесении рассеивающих объектов в светлую полосу необходимо учитывать дифракцию и дополнительную модуляцию интенсивности нескольких симметричных относительно этого объекта интерференционных максимумов. Положение относительно поглощающего объекта искажаемых по амплитуде максимумов определяется соотношением поперечных размеров ослабляющего объекта и расстоянием от экрана до плоскости наблюдения.

Анализ интерферограмм, которые регистрировали на расстояниях 0,13...2,5 м от рассеивающих объектов, вносимых в интерференционное поле с периодом 1,2 мм, показывает следующее. На расстоянии 0,135 м от проволоки на интерферограммах регистрируется четкая тень от проволоки ∅ 80 мкм и наблюдается модуляция интенсивности, за счет формирования дополнительных максимумов, в пределах одной светлой полосы и прилежащих минимумов. При этом в области тени интенсивность излучения уменьшается, а в области дополнительных максимумов увеличивается на величину до 40 %. На расстоянии 0,255 м от рассеивающего объекта, при внесении его в центр светлой полосы, модулируются также интенсивности соседних светлых полос. При этом изменение интенсивности в областях тени и дополнительных максимумов достигает до 25 %. В интерферограммах на расстоянии 0,445 м от препятствия одновременной модификации дифрагированной волной от возмущающего объекта могут подвергаться до четырех светлых смежных полос. Величина возмущения интенсивности в области тени и дополнительных экстремумов достигает до 20 %. В интерферограммах, регистрируемых на расстоянии 1,0...2,0 м от непрозрачного препятствия, величина модуляции распределения интенсивности светлых полос не превышает 10 %. Область возмущения дифрагированной волны распространяется на 6–7 светлых полос. При этом модуляция двух крайних максимумов в системе полос, обусловленных интерференцией потоков малой интенсивности на периферии пучков с гауссовским распределением поля, доходит до 40 %. При дальнейшем увеличении расстояния наблюдения основная часть энергии дифрагированной волны выходит за пределы коллимированного пучка. Поэтому влиянием дифрагированного потока на вид интерференционной картины можно пренебречь.

При высоком контрасте интерференционной картины звуковая карта ПЭВМ с высокой точностью регистрирует временной ход электрического сигнала ФЭУ, находящегося в звуковом диапазоне частот. При этом однополярный сигнал ФЭУ смещается относительно нулевой линии (рис. 3). Уменьшение контраста интерференционных полос при регистрации светового потока с помощью звуковой платы ПЭВМ, при малой частоте вращения поворотного зеркала, сопровождается потерей информации об интенсивности излучения. Поэтому при регистрации распределения интенсивностей в сечениях, в которых интерферирующие пучки значительно расходятся, использовано импульсное лазерное излучение.

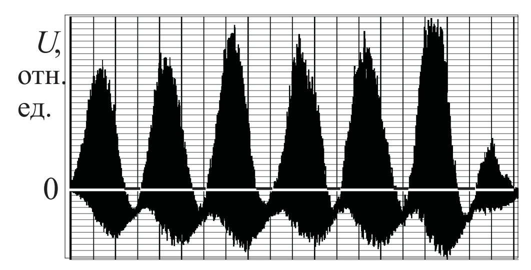


Рис. 4. *Вид электрического сигнала, регистрируемого в интерференционной картине с помощью модулированного пучка*

На рис. 4 приведен график сигнала, регистрируемый с помощью импульсов излучения гелий-неонового лазера длительностью 0,1 мс, следующих с частотой 5 кГц, а на рис. 5 – та же зависимость после предварительной цифровой обработки: фильтрации переменной составляющей и выделения огибающей. Интерферограмму регистрировали на расстоянии 3,5 м от делительного куба. Для обработки данных была использована программа, составленная на языке TP 7.0.

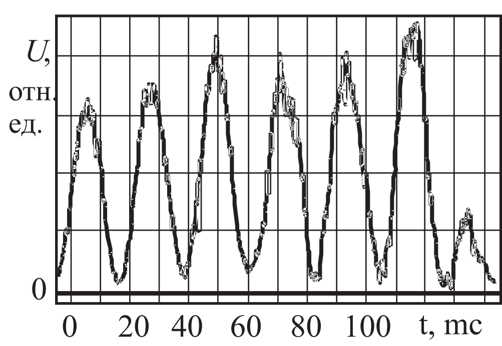


Рис. 5. *Распределение интенсивности в области интерференции*

В области максимума электрических импульсов (рис. 4, 5) также наблюдаются высокочастотные хаотично расположенные пички, обусловленные дробовыми шумами ФЭУ. Вид изменения электрического сигнала в области первого минимума в графике зависимости распределения интенсивности в области интерференции (рис. 5) близок к синусоиде.

Искажение формы максимумов и появление дополнительных пичков в областях минимумов интерференционной картины обусловлено частичным пространственным разделением пучков, имеющих неоднородное распределение интенсивности по сечению. Контраст интерференционной картины с периодом 1,2 мм на расстоянии 5 м от плоскости формирования когерентных волн, при взаимодействии многомодовых пучков диаметром 16 мм лазера ЛГН-118, уменьшается до значения 0,1.

Заключение

Экспериментально исследовано влияние дифрагированного на непрозрачных объектах потока на распределение интенсивности излучения в интерференционной картине. Установлено, что дифрагированный поток от непрозрачных объектов, превышающих длину волны зондирующего излучения, может изменять распределение интенсивности одной или нескольких светлых полос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика плазмы: Сб. статей. Вып. 7 / Под ред. М.И. Пергамента. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 271 с.
2. А.с. СССР 1508742. МКИ G01N 15/02. Способ определения параметров дисперсных частиц / И.А. Тихомиров, Ю.Д. Копытин, О.Г. Новиков, С.Ф. Баландин, В.Ф. Мышкин. Заявлено 19.08.1987; Опубл. Бюл. № 29 от 15.10.87. – 5 с.: ил.: 2.
3. А.с. СССР 1467449. МКИ G01N 15/02. Способ определения параметров дисперсных частиц / И.А. Тихомиров, О.Г. Новиков, В.Ф. Мышкин, С.Т. Мамыргазиев. Заявлено 01.06.1987; Опубл. 23.03.89, Бюл. № 11. – 5 с.: ил.: 1.
4. Ринкевичус Б.С., Янина Г.М. / В кн.: Парожидкостные потоки. – Минск: Ин-т тепломассообмена БССР. 1977. – 294 с.
5. Патент РФ 2184379. МКИ G01N 15/02. Способ формирования счетного объема для измерения скорости микронных и субмикронных дисперсных частиц / В.Ф. Мышкин, В.А. Власов, А.В. Литкевич. Заявлено 18.12.2000; Опубл. 27.06.2002, Бюл. № 18. – 5 с.: ил.: 2.
6. Патент РФ 2183828. МКП G01N 15/02. Способ определения малоугловой индикатрисы рассеяния / В.Ф. Мышкин, И.А. Тихомиров, В.Н. Цимбал, Б.П. Иваненко. Заявлено 25.12.2000; Опубл. 20.06.2002, Бюл. № 17. – 5 с.: ил.: 1.
7. Тихомиров И.А., Власов В.А., Мышкин В.Ф. и др. Методы и устройства по определению индикатрисы рассеяния лазерного излучения в газодисперсной среде // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 41–44.

УДК 621.38:681.33:535.4